

波動伝播に基づく移動機構の研究 (第3報, 柔軟生物の構造・環境・移動パターン)

江淵智浩^{*1}, 土屋学^{*2}, 前野隆司^{*3}, 山崎信寿^{*3}

Frictional Driving Mechanism Based on Wave Propagation (3rd Report, Relationship among Structure, Environment and Locomotive Pattern of Soft Creatures)

Tomohiro EBUCHI, Manabu TSUCHIYA, Takashi MAENO and
Nobutoshi YAMAZAKI

Soft-body creatures including earthworm, caterpillar and inchworm have their own locomotion pattern. They have common features as simple continuous segmental structure of their body and locomotion pattern in cooperation with partial motion of their body propagating waves. In this research, the influence of the structural feature of the soft-body creatures and the environmental conditions on its locomotion pattern are analyzed using genetic algorithms. As a result of the analysis, it is proved that the antagonistic muscle system of the soft-body creatures that consists of hydraulic framework urges its emergent acquisition of locomotion pattern by propagating the waves. It is also proved that the strength of materials of their body, power mass ratio and environmental conditions affect the difference in their locomotion pattern. The acquired locomotion patterns correspond well with these of the earthworm, caterpillar and inchworm.

Key Words: Biomechanics, Bio-motion, Worm, Wave Propagation, CPG, GA, Evolution

1. 緒 言

生物の持つ形態と移動様式は多様である。これは、それぞれの生物が、進化の過程において、生息する環境に最も適した形態と、形態に最も適した移動様式を同時に獲得した結果と考えられる。生物のうち、内骨格系を持たず原始的な移動運動を行うミミズやアオムシのような柔軟生物の移動様式にも種々のものがある。これらの共通した特徴として、体が単純な繰り返し構造から成り、部分の単純な運動の協調に基づき波動伝播パターンを生成することによって移動運動を行っていることが挙げられる。筆者らは、このような柔軟生物の移動様式を総称して波形伝播型運動パターンと呼び、ミミズの移動パターンの計測⁽¹⁾やシミュレーション⁽²⁾を行ってきた。また、近年、柔軟生物の特徴に学ぶ新たな移動機構開発も盛んに行われている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、柔軟生物の構造・環境と運動パターンの関係に

についての研究は十分に行われていない。

本報は、柔軟生物、特にミミズやアオムシのような生物において、形態的特徴と環境条件が波形伝播型運動パターンの獲得に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。まず、柔軟生物の移動様式を整理する。次に、柔軟生物のモデルを構築する。最後に、遺伝的アルゴリズムを用いた運動生成シミュレーションを行うことによって、柔軟生物の構造、弾性・筋力などの力学的特徴および生息環境が、その運動パターンに及ぼす影響を明らかにする。

2. 柔軟生物の形態と運動の特徴

本節では、ミミズ、アオムシ、シャクトリムシの構造および移動運動の特徴を、計測結果を交えて述べる。

2.1 ミミズ⁽¹⁾ ミミズの筋は、体の長手軸方向の長さを短縮させる縦走筋と、直径を減少させる環状筋より成る。環状筋と縦走筋は、体壁間に体腔液（非圧縮性液体）が満たされた水力学的骨格の効果により拮抗関係を有する。ミミズの移動様式の模式図を図 1(a)に示す。図 1 よりわかるように、環状筋が収縮して細長くなることにより前進する部分は、徐々に後方に移

原稿受付 2001 年 7 月 26 日

^{*1} 学生員, 慶応義塾大学大学院

^{*2} 正員, NTT コミュニケーションズ

^{*3} 正員, 慶応義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

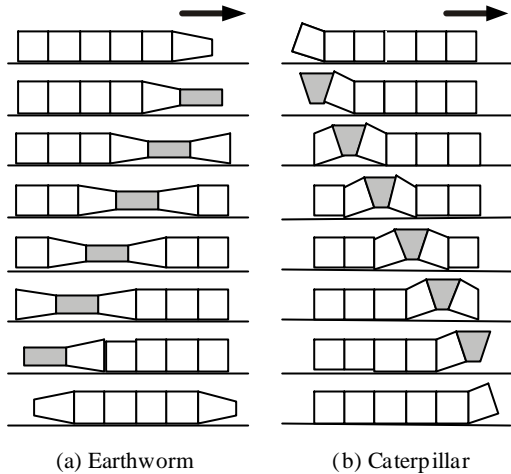


Fig. 1 Locomotion pattern of soft creatures

動する後退波となっている。

2.2 アオムシ 鱗翅類の幼虫（アオムシ、シャクトリムシなど）はミミズと同様に体節毎に環状筋と縦走筋を有し、その収縮と弛緩により移動運動を行う。体は明瞭に環節化されており、腹脚を有する。例えば、カイコガは4対の腹脚と一对の尾脚を持ち、これらにより体が支持される。触覚と胸脚を持っているが、あまり発達はしておらず、胸脚はむしろ感覚器的な機能を果たしている⁽⁶⁾。

アオムシ（スズメガの幼虫）の移動運動の計測結果を図2に、模式図を図1(b)に示す。計測は、紙の上を直進移動するアオムシをデジタルビデオカメラで撮影した後に、頭先端、尾後端および脚の進行方向移動量を画像から読み取ることにより行った。図を見ると、まず尾脚が前方に踏み出し、続いて後方の腹脚から前方の腹脚へと波形を伝播させるように踏み出す脚が移動し、最後に胸脚が踏み出されていることがわかる。つまり、ミミズとは逆に、前進波を伝播させながら移動している。なお、アオムシが滑らかな平地上を移動する際には、脚による地面の把持は行えないため、ミミズのように這行運動によって移動していた。

アオムシは主に樹上で生活しており、枝間を移動する必要があるため、脚は自重を支えるのに十分な把持力を持ち、筋は体を持ち上げたり姿勢を保持するのに十分な筋力を有すると考えられる。ミミズとアオムシに麻酔をかけた後に頭部と尾部を固定して引っ張り、張力と変位の関係を計測したところ、応力-ひずみ関係はほぼ同じオーダーであった。アオムシの方がアスペクト比（長さ/太さ）が小さいので、長さで割って無次元化して考えると、アオムシの方が相対的に剛性が高いといえる。

2.3 シャクトリムシ 鱗翅類のシャクガの幼虫で

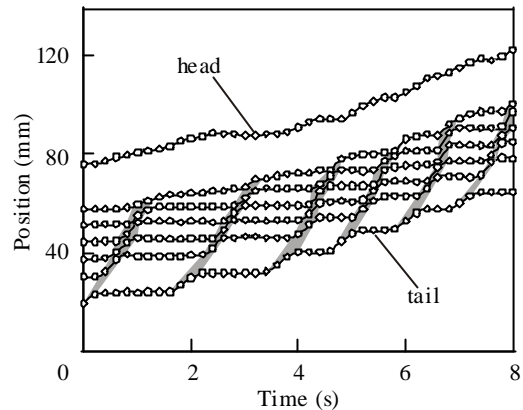


Fig. 2 Measured locomotion pattern of caterpillar

あるシャクトリムシの移動運動は、よく知られているように、まず尾脚を前進させ体をくの字に大きく屈曲させてから地面を把握し、次に胸脚を前方に運び体を伸ばす。移動運動を行う部分は体の尾部から頭部に移動するので、広義にはアオムシと同様な前進波型の運動パターンに分類することもできるが、波動を伝播するというよりも、屈曲と伸展という2つの動作を繰り返す2拍子的な運動パターンであるという方が適切である。

シャクトリムシは、移動の際に体を屈曲させて大きく持ち上げる必要がある。また、擬態と呼ばれる木の枝を擬した行動を行うため、体を後端部の1点のみで支持し、片持ち梁の形状を維持する必要がある。これらより、シャクトリムシは前述のアオムシよりも筋力が大きく、拮抗筋を同時に収縮させることによって体の剛性を大きく保つことができると考えられる。

3. 柔軟生物のモデル化および計算方法

本節では、柔軟生物のモデル化の方針、手法、計算方法について述べる。

3.1 モデル化の方針 柔軟生物に共通な形態及び移動運動の特徴として次の4点が挙げられる。

- (1) 多数の体節が連続的に一列に並び細長い繰り返し構造を有する。
- (2) 体壁には縦走筋および環状筋を含み、両者は水力学的骨格により拮抗関係を有する。
- (3) 体は柔軟で、可変弾性特性を有する。
- (4) 体の各部分が一定のリズムで収縮する局所運動が、隣接部分との間で協調運動する結果、全体として秩序だった移動運動を形成する。

柔軟生物のこれらの特徴を、本稿では以下のようにモデル化する。

まず、移動速度は緩やかであることから、慣性力は

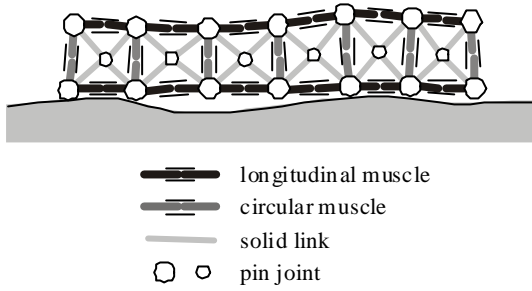


Fig. 3 Model of antagonistic muscle of soft creatures

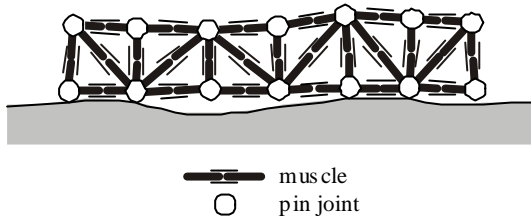


Fig. 4 Model without antagonistic muscle system

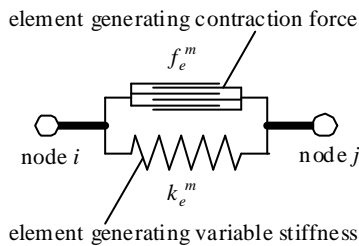


Fig. 5 Detailed model of muscle

無視する。柔軟生物のモデルは、その進行方向を含む鉛直平面内(矢状面内)に限定する。神経系からの刺激入力により収縮可能な1次元リンク要素によって筋肉と体壁の収縮をモデル化し、それらをピンジョイントで結合し直並列に配置することにより柔軟生物の体を表現する。柔軟生物の運動において支配的となる接触状態の解析は、接触点において接触するか否か、接触点において固着するか否かをそれぞれ2値的に扱い、その収束演算を行うことによって解析する手法⁽²⁾を用いる。神経系においては感覚受容器および自己受容器を考慮し、リズム発生機構は正弦波で簡略化して表す。以下にモデルの詳細について述べる。

3.2 構造モデル 構造モデルを構築する際に、上述の形態の特徴を必要十分に表現できていることが重要である。このため、図3のような2次元モデルを構築した。すなわち、十分に硬い剛体リンク要素をパンタグラフ状に組んだものを回転可能なピンジョイントにより長手軸方向に多数連結し、それらの回転軸間に伸縮可能なリンク要素を拮抗的に配置した。伸縮可能なリンク要素が、柔軟生物の運動単位となる筋と体壁に相当するものとする。図3において、垂直要素は環状

筋に、水平要素は縦走筋に相当する(筋・体壁モデルの詳細は3.3で述べる)。また、非伸縮剛体リンク要素をパンタグラフ状に組むことにより、筋要素の収縮は必ず他の要素の伸縮に影響を与えるという、水力学的骨格に基づく拮抗関係を表現している。この点が、前報⁽²⁾のモデルと異なる点である。図3において、筋要素4つで囲まれ、その中に非伸縮要素4つを含む四角形を、柔軟生物の一体節と考えることができる。腹側と背側の縦走筋を同時に収縮させることによりミミズのような縦方向の伸縮運動が、腹側のみを収縮させることによりアオムシのような曲げ運動が、それぞれ表現できると考えられる。

また、拮抗筋の重要性を示すための比較対象として、筋の拮抗関係を排除した図4の構造モデルを構築した。図4のモデルは、生物モデル単体では、ある筋が収縮する際に他の筋へ力が伝達しない構造となっている。

冗長な繰り返し構造を十分に表現でき、かつ計算時間が十分短いことを考慮して、体節数は両モデルとも6とした。

3.3 筋・体壁モデル 伸縮リンク要素の詳細を図5に示す。伸縮リンク要素は、具体的には、神経系からの入力に応じて収縮力を発生する要素と、それに並列につながれた弾性要素から成る。

生物は、非線形特性を有する拮抗筋を同時に収縮させて体の剛性を変化させることができる。拮抗筋は、柔軟生物の場合には環状筋と縦走筋、脊椎動物の場合には屈曲筋と伸展筋というように構造は異なるものの、剛性を変化させる機構は同様である。本研究では、環状筋と縦走筋の可変弾性を再現するために、弾性係数を神経系からの入力の関数とする可変弾性筋モデルを構築した。筋における伸縮リンク要素 e 内の弾性要素の弾性係数 k_e^m は、

$$k_e^m = k_{max}^m \cdot (a + 0.5) \quad (1)$$

と表せる⁽²⁾。ただし、 a は神経系モデルからの正規化された入力、 k_{max}^m は最大弾性係数である。 a に0.5を加えることによって体壁の弾性をモデル化した。すなわち、神経系モデルからの出力が0の場合にも筋・体壁モデルの弾性が0とならないようにした。

モデルとしては、弾性係数の異なる3つのモデルを構築した。3つのモデルにおける k_{max}^m は、それぞれ、2.5 N/m, 10.0 N/m, 80.0 N/mとした。また、実際の柔軟生物の物性値を参考にして、伸縮リンク要素の自然長は10 mm, 質量は0.116gとした。最大発生張力は最大収縮時の伸縮リンク要素長さが自然長の80%にな

るときとした．つまり，モデルの弾性係数に比例した筋張力を発生できるものとした．実際の生物のアスペクト比（縦横比）の違いをモデル化するためには，モデルのアスペクト比を変えることも考えられる．しかし，本モデルでは，アスペクト比は一定とし，弾性係数を変化させることによって，生物の違いを表現している．これは，アスペクト比を変化させると，ある要素における単位長さあたりの剛性も変化してしまい，形状と剛性の影響を別個に表現できないからである．

3.4 神経系モデル 生物には中枢パターン発生器（Central Pattern Generator, CPG）と呼ばれる自励神経発振機構があり，周期的な運動は低次レベルの神経系における CPG の神経活動として獲得されていることが知られている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾．また，ミミズでは，体節ごとに存在する多数の CPG が協調的に動作する結果，波動の伝播が実現されていることが知られている⁽¹⁰⁾．

本研究では，分散配置された CPG を正弦波により近似するとともに，実際の柔軟生物に存在する運動神経，接触感覚受容器，自己受容器（長さセンサ）をモデル化する．

(1) 運動神経 運動神経はモデルの運動単位である伸縮リンク要素毎に存在し，伸縮リンク要素は運動神経から出力された正規化信号 $u_e(t)$ によって収縮力 f_m^e を発生するものとする．要素 e に対応する運動神経 M_e

$$T_e \frac{du_e(t)}{dt} + u_e(t) = w_r R_e(t) + \sum w_c C_e(t) + \sum w_s S_e(t) \quad (2)$$

の状態を表す膜電位 $u_e(t)$ は，により表されるものとする．ただし，リズム入力を $R_e(t)$ ，接触感覚入力を $C_e(t)$ ，自己受容器からの入力を $S_e(t)$ ，それぞれの重みを w_r, w_c, w_s ，時定数を T_e とする．

膜電位 $u_e(t)$ によって決まる運動神経の出力 $y_e(t)$ は，シグモイド関数を用いて表し， $u_e(t)$ の値に応じて 0 から 1 の範囲内の値をとるようにした．出力を決める関

$$y_e(t) = \frac{1}{1 + \exp(-x(u_e(t) - U_0))} \quad (3)$$

数は， ξ と U_0 はシグモイド関数のパラメータである．

(2) リズム入力パターン 本研究では，各リンクに配置された中枢パターン発生器から運動神経へのパターン入力を正弦波に仮定する．運動神経 M_e へのリズムパターン入力 $R_e(t)$ を，

$$R_e(t) = a_e + c_e \cdot \sin(\omega t + f_e) \quad (4)$$

と定義する．ただし， c_e は振幅， a_e は振動中心， f_e は位相差， ω はリズムの角周波数である． ω の値は全ての $R_e(t)$ において等しいものとした．

(3) 接触感覚受容器 接触感覚受容器は節点 i の法線方向接触反力 $F_i^n(t)$ を検出するものと仮定する．単純化のため，非線形な出力関数は特に定義せず，接触感覚神経の状態変数（膜電位） $c_i(t)$ をそのまま出力とする．したがって，接触感覚受容器のモデルは次式により表される．

$$\frac{dc_i(t)}{dt} + c_i(t) = F_i^n(t) \quad (5)$$

また，接触感覚は，接触点に隣接した伸縮リンク要素のみに影響するという局所ルールを仮定し，このルールを全ての節点に適用した．すなわち，要素 e の運動神経への接触感覚入力 $C_e(t)$ は，上述の局所ルールにより定められた節点からの接触感覚情報 $c_i(t)$ の重み付き和で与えられることになる．

(4) 自己受容器 自己受容器は伸縮リンク要素の長さを検出し，その伸縮リンク要素と隣接要素の運動神経に情報をフィードバックする．自己受容器は，伸縮リンク要素が自然長 \bar{l} よりも長くなったときに運動神経に出力 $S_e(t)$ を伝えるものとした．すなわち，自己受容器モデルを，

$$S_e(t) = \max\left(\frac{l_e(t)}{\bar{l}} - 1, 0\right) \quad (6)$$

のように表す．ただし $l_e(t)$ は要素 e の長さである．

上述のような神経系の各構成要素のモデルを統合することによって神経系モデル全体を構成する．すなわち，各伸縮リンク要素の運動は，リズム入力に加えて，隣接した伸縮リンク要素の長さおよび両端節点の接触反力によって決定される．したがって，運動神経の内部変数 $u_e(t)$ は，次式のようになる．

$$T_e \frac{du_e(t)}{dt} + u_e(t) = w_r (a_e + c_e \cdot \sin(\omega t + f_e)) + \sum w_c \left(\sum_{node} w_{ci} c_i(t) \right) + \sum w_s \cdot \max\left(\frac{l_e(t)}{\bar{l}} - 1, 0\right) \quad (7)$$

式(7)において，リズムに関係する変数 a_e, c_e, f_e, w_r ，接触に関わる変数 w_c, w_{ci} および自己受容器に関わる変数 w_s が決められれば，運動のリズムが定まる．これらのパラメータを GA により探索し，最適化するものとする．ただし，変数の冗長さを取り除くために， $w_r = w_c = 1$ とする．

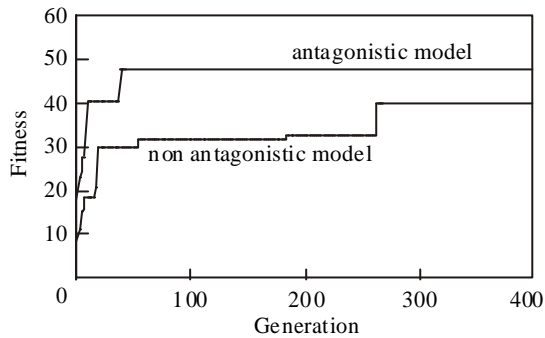


Fig. 6 Change in fitness during GA calculation

3・5 計算手法 生物が構造・環境に適合した運動パターンを進化的に獲得した様子を再現するためには、まさに進化を模倣した非線形最適化手法であり、解空間が多峰性を有する際に収束値を求めることが可能な、進化的計算法が適している。このため、上述の各モデルを用い、柔軟生物の移動運動パターンを進化的に生成するシミュレーションを行う。進化的計算には遺伝的アルゴリズム⁽¹¹⁾を用いる。

運動の解析は、前報⁽²⁾と同様に、剛性方程式を用いた一般的構造解析手法に基づいて行う。移動の環境は、平面形状を持つ地面および管路内とする。

全てのシミュレーションにおいて、適応度は移動距離とし、同様の条件で3回計算を行ったもののうち、最も適応度の高いものを結果として採用した。

4. シミュレーション結果と考察

本節では、3つの仮説と、それを実証する計算結果について述べる。

4・1 筋の拮抗関係は波動伝播型移動運動の創発的な獲得に影響するか 柔軟生物の移動運動は、形態、筋、神経系、環境などの相互作用によりボトムアップ的に獲得される創発現象の一つであると考えられる。創発現象においては、下位レベルの非線形な相互作用が上位レベルの現象にボトムアップ的に作用する点が重要

である。例えば、神経回路網は非線形相互作用により全体のパターンを生成する系であり、創発的にパターンを生成するためには神経素子間の相互抑制結合が重要であることが知られている⁽¹²⁾。生物の身体の拮抗筋システムも、神経系と同様、局所的な相互抑制的非線形相互作用を行う系であるので、この作用が、生物の移動運動の進化を促進しているのではないかと推測できる。

特に、筋が拮抗関係を有することによって、ある筋の能動的な収縮が隣接した筋の受動的な伸長を引き起こすような、筋の長さ変化の連鎖的な伝播を生成することができる。したがって、拮抗筋システムは、波形伝播型の移動運動を生成しやすくしているのではないだろうか。

これらの仮説を検証するため、拮抗モデル(図3)と非拮抗モデル(図4)の計算結果を比較した。共通の条件として、可変弾性筋モデル、中間の弾性係数($k_{max}^m = 10.0 \text{ N/m}$)、平地環境を用い、計算時間は30s、計算の最大世代数は400世代とした。

拮抗モデル、非拮抗モデルにおける最大適応度の変化を図6に示す。両者を比較すると、非拮抗モデルの結果に比べ、拮抗モデルの結果は適応度の上昇が急であり、最大適応度の収束も早い。これは、筋群の拮抗関係により筋同士の相互結合性が高まり、ボトムアップ的な運動の獲得が促されたためと考えられる。

拮抗モデル(中間弾性係数モデル, $k_{max}^m = 10.0 \text{ N/m}$)における移動運動のアニメーション表示を図7(b)に、腹側節点の時系列位置データを図8に示す。図7(b)より、拮抗モデルでは体を短縮させ直径を増大させる部分(グレー表示)が徐々に前方に移動している様子がわかる。図8からも、同様に、前進する節点が徐々に体の前方に移動していく様子がわかる。これらは、図1(b)および図2に示したアオムシの計測結果と類似している。以上より、拮抗モデルの結果は前進波

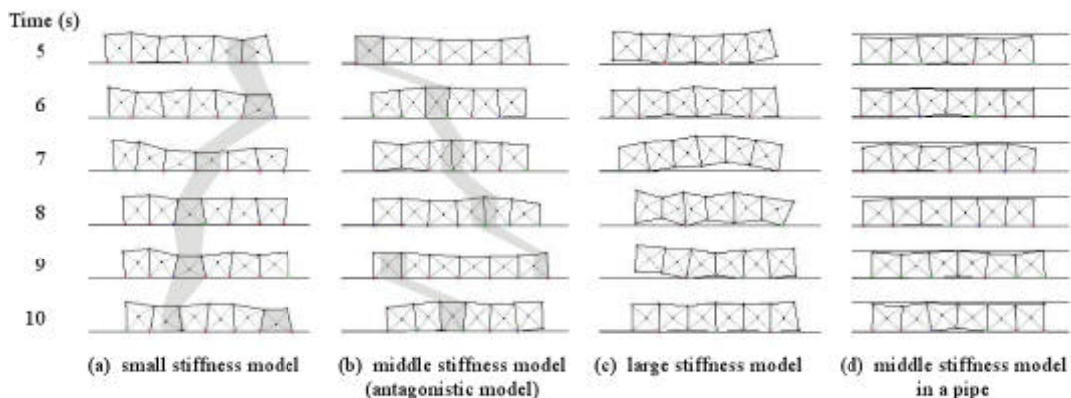


Fig. 7 Calculated movement patterns

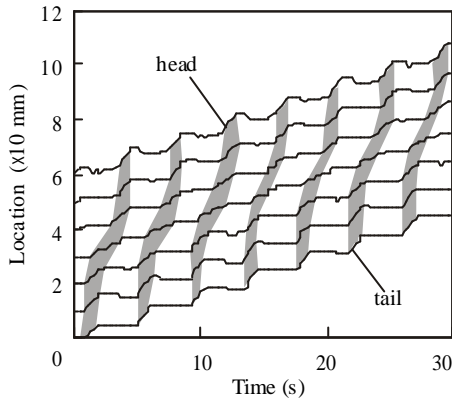


Fig. 8 Calculated locomotion pattern of antagonistic (middle stiffness) model

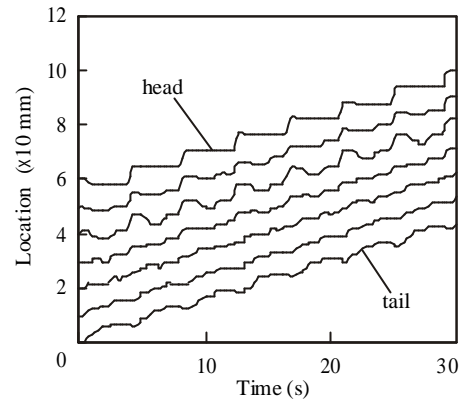


Fig. 9 Calculated locomotion pattern of non-antagonistic model

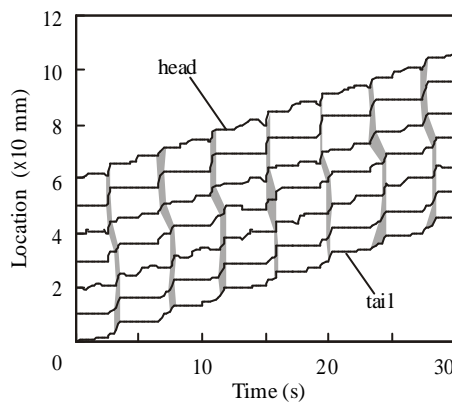


Fig. 10 Calculated locomotion pattern of small stiffness model

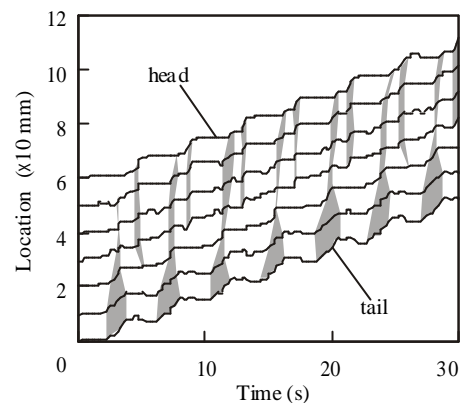


Fig. 11 Calculated locomotion pattern of large stiffness model

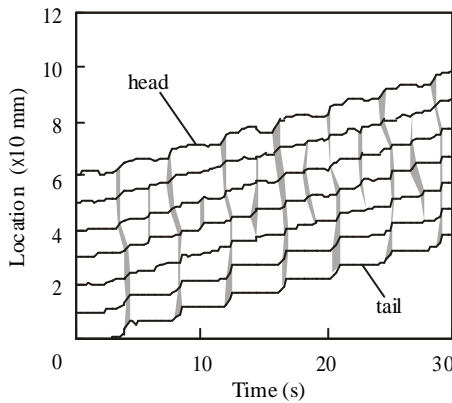


Fig. 12 Calculated locomotion pattern of antagonistic model in a pipe

型の波形伝播型運動パターンであると判断できる。

非拮抗モデルにおける腹側節点の時系列位置データは、図9のようになっている。図9を見ると、頭部から3つの節点ではリズムが生成されているものの、中央部から尾部にかけての運動はランダム性が強く、体全体に秩序だったリズムが生成されたとはいえない。同様に、非拮抗モデルにおけるアニメーション表示や運動神経出力の履歴を観察したところ、特徴的な挙動

は見られなかった。

これらより、筋群の拮抗関係は波形伝播型の運動パターン獲得を促す重要な因子であると考えられる。

4.2 体の弾性と筋力は運動パターンに影響するか

ミミズ、アオムシ、シャクトリムシの運動パターンの差異の原因は、各々の生物の弾性係数と筋力の差異ではなからうか。この仮説を検証するために、4.1節で用いた拮抗モデル（中間弾性係数モデル）の最大筋張力および弾性係数を1/4倍および8倍に変更した場合のシミュレーションを行った。

弾性係数1/4倍モデルの結果のアニメーション表示を図7(a)に、腹側節点の時系列位置データを図10に示す。図を見ると、弾性係数1/4倍モデルの結果においては、前進する部分が徐々に体の後方に遷移していく様子わかる。これは、弾性係数および筋力が小さいので体を曲げて持ち上げるような動作が行えないため、長手方向に伸縮する縦振動的な運動パターンを獲得したことを示している。このパターンはミミズが行う後退波型の運動パターンと一致している。つまりミミズは体の弾性係数が小さいゆえに、伸縮の波動を

後方に伝播する運動を生成しているのである。

次に、弾性係数 8 倍モデルの結果のアニメーション表示を図 7(c) に、腹側節点の時系列位置データを図 11 に示す。図を見ると、体を大きく屈曲させる動作の繰り返しによって前進している様子がわかる。つまり、弾性係数および筋力が大きいモデルは、シャクトリムシのように体を持ち上げて進む 2 拍子的な運動パターンを獲得することができた。シャクトリムシほどには体を持ち上げられないのは、伸縮リンク長さ自然長の 80% までしか収縮しないこと、本シミュレーションでは脚により地面を把持する作用を考慮していないこと等に起因する。

以上のように、ミミズ、アオムシ、シャクトリムシの運動パターンの違いは、弾性係数と筋力の違いに基づいて進化的に獲得されたものであることを、構成的手法のひとつであるコンピュータシミュレーションによって確認することができた。

4.3 生息環境は運動パターンに影響するか 生物が形態と運動パターンを進化的に獲得する際に、その環境条件が重要であることは言うまでもない。たとえば、基本的に土中で生活するミミズの形態と運動パターンは、土中に適応した結果であると考えるのが自然である。このため、環境が柔軟生物の運動パターンの差異の要因となることを確認するために、4.1 節の拮抗モデル（中間弾性係数モデル）の環境を、管路内モデルに変更した場合のシミュレーションを行った。

管路内モデルの結果におけるアニメーション表示を図 7(d) に、腹側節点の時系列位置データを図 12 に示す。図 7(b) と (d)、図 8 と図 12 を比較すると、生物の構造モデルは同じであるにもかかわらず、環境が平地の場合には前進波を伝播するアオムシ型のパターンを呈していた（図 8）のに対し、環境を管路内に変更すると、ミミズのような後退波型の運動パターンに近い結果となっている（図 12）ことがわかる。また、管路内モデルの移動速度は遅く、ミミズがアオムシより遅いことと対応している。すなわち、曲げ運動の許される広い空間内においてはアオムシ型の運動パターンを獲得できるモデルであっても、狭い管路内においてはミミズ型の伸縮運動パターンが最適解として獲得されるといえる。以上より、柔軟生物の形態と運動パターンは、環境条件に応じて獲得されることを確認できたといえる。

5. 結 言

柔軟生物の構造・形態と環境を考慮したモデルを構築し、移動運動を進化的計算により創発的に獲得する

シミュレーションを行った。この結果、柔軟生物の水力学的骨格によりもたらされる拮抗筋システムが、波形伝播型の運動パターンの創発的な獲得を促す重要な因子であることがわかった。また、柔軟生物の弾性や筋力などの差異は獲得される波動伝播型運動パターンの差異に大きく影響し、モデルの弾性係数が大きくなると、獲得される運動パターンは、ミミズ型（後退波型）からアオムシ型（前進波型）、シャクトリムシ型（2 拍子型）へと変化することがわかった。また、管路内においては、ミミズ型の運動パターンが最適な運動パターンとして獲得されることがわかった。

参考文献

- (1) 前野, 山崎, 立川, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第 1 報, ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション), 機論, 62-603, C (1996), 142-149.
- (2) 土屋, 前野, 山崎, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第 2 報, 体節の変形を考慮した細長動物の構造モデル), 機論, 65-636, C, (1999), 296-297.
- (3) 広瀬, 生物機械工学, (1987), 工業調査会.
- (4) 大野, 広瀬, 能動インテリジェントロボットに関する研究構成単位節の設計とシステム化の考察, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 17, (1999), 921-922.
- (5) 滝田, 長谷川, 布引, 尺取虫ロボットの階段登りに関する研究, 機論, 64-623, C (1998), 2571-2576.
- (6) 石井, 昆虫生理学, 培風館, (1982), 168-170.
- (7) 湯浅, 伊東, 伊藤, 四脚動物の歩行パターン遷移モデル, BME, 12-5, (1998) 67-74.
- (8) Gunther S. Stent, William B. Kristan Jr., W. Otto Friesen, Carol A. Ort, Margaret Poon, Ronald L. Calabrese, Neuronal Generation of the Leech Swimming Movement, SCIENCE, 200, (1978), 1348-1357.
- (9) 真島, 辰巳, 鈴木, Wilson-Cowan 型方程式の神経オシレーターへの応用 ザリガニ遊泳肢の位相同調モデル, 電子通信学会技術資料 MBE80-110, (1981), 89-92.
- (10) K. Mizutani, K. Oka, H. et.al., Analysis of Earthworm behavior with Simultaneous Recordings of Motoneuron and Extracellular Field Potential, Society for Neuroscience abstracts, 26 Part 2, (1999), 2175.
- (11) 北野編, 遺伝的アルゴリズム, (1994), 産業図書.
- (12) 甘利, 神経回路網の数理, (1974), 産業図書.